

# Izrada i baždarenje mjernog pretvornika sile

---

**Rimac, Nikola**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2016**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Chemical Engineering and Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:149:759278>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-30**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb](#)



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE**  
**SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ**

**Nikola Rimac**

**ZAVRŠNI RAD**

**Zagreb, srpanj 2016.**

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE**  
**SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ**

**Nikola Rimac**

**IZRADA I BAŽDARENJE MJERNOG PRETVORNIKA SILE**  
**ZAVRŠNI RAD**

**Voditelj rada: Izv. prof. dr. sc. Juraj Šipušić**

**Članovi ispitnog povjerenstva:**

**Izv. prof. dr. sc. Juraj Šipušić**

**Izv. prof. dr. sc. Nenad Bolf**

**Doc. dr. sc. Domagoj Vrsaljko**

**Zagreb, srpanj 2016.**

## SAŽETAK

U ovom radu dokazana je teoretska ovisnost ulaznih i izlaznih veličina, te je konstruiran i umjeren mjerni pretvornik sile u uređaju za mjerenje mase tijela preko frekvencije napete žice. Teoretski su obrazložene karakteristike mjerenja, značajke mjernog pretvornika, te općenito potreba za istim. Istaknute su poteškoće tijekom izrade i umjeravanja, te su dane smjernice za daljnja istraživanja. U eksperimentalnom dijelu ovoga rada konstruirana je i umjerena frekvencijska vaga. Dokazana je funkcionalnost metode te su eksperimentalni podaci popratili teoretsku osnovu. Mjerenje je brzo i jednostavno, a rad može poslužiti kao osnova za daljnja istraživanja ovisnosti frekvencije i mase, odabira materijala, te dimenzioniranja i konstruiranja vagi na navedenom principu.

**Ključne riječi:** Frekvencijska vaga, napeta žica, umjeravanje

## **ABSTRACT**

In this paper, the theoretical dependence of input and output size is demonstrated, and force sensor in the device for measuring body mass over the frequency taut wire was designed and calibrated. Characteristics measurements, the transmitter features and generally need for them, are theoretically reasoned. Difficulties during the development and calibration are highlighted, and guidelines for further research are given. In the experimental part of this work, the frequency scale is designed and moderated. The functionality of the method is proven and experimental data covered the theoretical basis. Measurement is fast and simple, and the work can serve as a basis for further study of the frequency dependence and weight, material selection and dimensioning and construction of scales on the above principle.

**Keywords:** Frequency scale, taut wire, calibration

# SADRŽAJ

## SAŽETAK ABSTRACT

<b>1. UVOD</b> .....	1
<b>2. OPĆI DIO</b> .....	2
2.1 SILA.....	2
2.2. MJERENJE I BAŽDARENJE .....	3
2.3. ZNAČAJKE MJERNIH PRETVORNIKA .....	4
2.3.1. Ulazne značajke.....	4
2.3.2. Izlazne značajke .....	5
2.3.3. Prijenosne značajke .....	5
2.3.4. Sklad s okolinom .....	8
2.3.5. Pouzdanost .....	9
2.4. POGREŠKE MJERENJA .....	9
2.4.1. Tipovi pogrešaka .....	9
2.4.2. Izvori pogrešaka .....	10
2.5. MJERENJE SILE.....	11
2.5.1. Mjerni pretvornici sile .....	11
2.6 ODREĐIVANJE MASE PREKO NAPETOSTI ŽICE .....	12
2.6.1. Napetost žice .....	13
2.6.2. Valovi na napetoj žici.....	13
2.6.3. Masa iskazana frekvencijom napete žice.....	15
<b>3. EKSPERIMENTALNI DIO</b> .....	17
3.1. FREKVENCIJSKA VAGA.....	17
3.2. APARATURA .....	18
3.3. IZRADA UREĐAJA I PRIPREMA MJERENJA.....	20
3.4. OPIS RADA.....	21
<b>4. REZULTATI I RASPRAVA</b> .....	22
4.1. PRIKAZ REZULTATA.....	23
4.2. OBRADA REZULTATA.....	24
4.2.1. Određivanje frekvencija .....	24
4.2.2. Određivanje značajki mjernog pretvornika.....	31
4.2.3. Mehaničke karakteristike žice .....	35
4.2.4. Općenito o frekvencijskoj vagi.....	36
<b>5. ZAKLJUČAK</b> .....	37
<b>POPIS SIMBOLA</b> .....	38
<b>LITERATURA</b> .....	39
<b>ŽIVOTOPIS</b> .....	40

## **Zahvala**

*Zahvaljujem svom mentoru izv. prof. dr. sc. Juraju Šipušiću na stručnoj pomoći pri izradi ovog završnog rada, te puno prenesenog znanja u našem kratkom druženju. Iskreno se nadam daljnjoj suradnji.*

*Zahvaljujem svojim prijateljima i kolegama što su mi olakšali studiranje, najviše Matiji i Josipi na svesrdnom prijateljstvu i potpori.*

*Posebno zahvaljujem roditeljima što su mi omogućili studiranje, hrabрили me i podržavali, a posebno braći Ivanu i Josipu bez čije bezuvjetne pomoći ne bih došao do ovdje.*

# 1. UVOD

U svakodnevnom životu, a najviše u znanstveno-istraživačkoj praksi imamo potrebu za mjerenjem. Uređaji i načini svakodnevnog mjerenja pojava, poput mjerenja temperature na termometru, odavno su poznati i usavršeni. Takvim uređajima uglavnom se ne daje na važnosti jer su provjereni, te je ona razina potrebne točnosti takvog uređaja dovoljna za ono za što se koriste. Međutim, kada je uređaj za mjerenje neke pojave od visoke važnosti za rizična pitanja, primjerice ekološkog ili ekonomskog, tada se pristupa drugačije. Izradi se tada pristupa sa pomno izabranom i konstruiranom opremom, načelima rada te interpretacijom dobivenih podataka. U nekom mjernom uređaju, posebnu pozornost ima dio koji se naziva mjerni pretvornik. Upravo je taj dio onaj koji nekoj fizikalnoj pojavi koju želimo izmjeriti daje neku mjerljivu vrijednost. Principi rada mjernih pretvornika zahtijevaju poznavanje fizikalnih pojava i veličina te međusobne ovisnosti.

U ovom radu istražena je mogućnost izrade i primjene mjernog pretvornika sile koji se temelji na pretvaranju mjerene veličine - napetosti niti - u frekvenciju. Daljnja je motivacija izrade ovakvog mjernog pretvornika njegova potencijalno velika preciznost jer je i frekvenciju moguće vrlo precizno odrediti. Pojava bliska svakodnevnom iskustvu je promjena tona žice gitare ovisno o napetosti i debljini žice. U radu je uporabljena komercijalno dostupna žica za gitaru promjera 0.279 mm izrađena od magnetičnog ugljičnog čelika.

U teoretskom dijelu ovog rada obrađena su osnovna stajališta, od samog pojma sile do svih važnih značajki mjernih pretvornika sile, kao i vrste pogrešaka. Izradom mjernog pretvornika sile (frekvencijska vaga) pokazano je dobro slaganje eksperimenta i teorije.



## 2. OPĆI DIO

### 2.1 SILA

Sila je veličina potrebna da bi se uzrokovala promjena stanja gibanja ili mirovanja. Kad sila djeluje na tijelo, ono se ubrzava u smjeru djelovanja te sile; sila je uzrok gibanja tijela. Ako su sile u ravnoteži, tada one opterećuju tijelo i uzrok su deformacije, stezanja ili rastezanja tijela.[1]

Sila ima iznos i smjer, vektorska je veličina. Obilježava se simbolom  $F$ , a SI jedinica za silu je njutn čija je oznaka N.

U dvadesetom stoljeću pokazalo se da se sve sile mogu razložiti na četiri fundamentalne sile koje djeluju na elementarnu česticu.

Četiri vrste fundamentalnih interakcija su:

- Gravitacijska sila
- Elektromagnetska sila
- Slaba nuklearna sila
- Jaka nuklearna sila

Gravitacijska i elektromagnetna sila opažaju se na velikim udaljenostima, dok se slaba i jaka nuklearna sila opažaju na malim udaljenostima u razmjerima atomske jezgre.

## 2.2. MJERENJE I BAŽDARENJE

Prema definiciji, mjerenje je uspoređivanje stanovite kakvoće, pojave ili tvorevine s odabranom isto takvom usporedbenom kakvoćom, pojavom ili tvorevinom. Pri mjerenjima u znanosti i tehnici posebno je važna pretvorba različitih kakvoća tvari i energije u motrive promjene. Radi se o mjerenju veličina značajnih za stanje tvari i energije, pa se o njima obično i govori kao o mjernim veličinama ( temperatura, tlak, struja itd.). Naprave izrađene u svrhu takve pretvorbe, nazivaju se mjerna osjetila. Sastavni su dio mjernih spojeva, pomoću kojih se, uspoređivanjem s usporednom vrijednosti, mjerenoj veličini pridružuje brojčana vrijednost. Takav mjerni spoj naziva se mjerni pretvornik. [1]



Slika 2-1. Shema rada mjernog pretvornika [2]

Za odabir mjernog pretvornika potrebno je odgovoriti na niz pitanja. Koje je normalno radno područje mjerene varijable, kolika je točnost, preciznost i osjetljivost? Kakva dinamika osjetila, te kolika je pouzdanost potrebna? Na kraju, kolika je cijena izrade i održavanja istog?

*Točnost* je definirana kao blizina izmjerene vrijednosti pravoj vrijednosti mjerene varijable. To je slaganje između mjernog rezultata i prave vrijednosti mjerene veličine.

*Preciznost* je mjera veličine slučajne pogreške te je kao pojam povezan s pojmom ponovljivosti koji je definiran u nastavku.

Za vođenje procesa, preciznost i ponovljivost su važnije od točnosti. [2]

*Baždarenje, kalibracija ili umjeravanje* je postupak određivanja statičke karakteristike. Baždarenju se pristupa u četiri koraka:

1. Proučava se način djelovanja i izvedba pretvornika, pa se uz mjerenu veličinu određuju i druge moguće utjecajne (ulazne) veličine.
2. Određuje se koje od ulaznih veličina utječu bitno na rad pretvornika s gledišta predviđene primjene.
3. Izabire se oprema kojom će se odabrane ulazne veličine moći prema potrebi mijenjati unutar određenog područja ili održavati na stalnoj vrijednosti.
4. Tražena statička zavisnost izlazne od ulazne veličine dobije se održavanjem jednih ulaznih veličina na stalnoj vrijednosti i mijenjanjem vrijednosti drugih uz zapisivanje vrijednosti izlazne veličine.

## **2.3. ZNAČAJKE MJERNIH PRETVORNIKA**

Značajke mjernih pretvornika prikladno je svrstati u pet skupina:

1. Ulazne značajke
2. Izlazne značajke
3. Prijenosne značajke
4. Sklad s okolinom
5. Pouzdanost

### **2.3.1. Ulazne značajke**

Ulazne značajke mjernog pretvornika su mjerena veličina, mjerno područje i mjerni opseg. Mjerena veličina je veličina što je treba osjećati i pretvoriti u mjerni signal. Mjerena veličina je ulazna veličina, odnosno ulaz mjernog pretvornika. Neki od primjera mjerenih veličina su sila, temperatura, napon, gustoća, brzina i dr.

Mjerno područje obuhvaća vrijednost mjerene veličine za koje se dani pretvornik može upotrebljavati. Izražava se najvećom i najmanjom vrijednosti mjerene veličine. [1]

### 2.3.2. Izlazne značajke

Izlazne značajke mjernog pretvornika su mjerni signal, područje mjernog signala, vrste mjernog signala, izlazna impedancija i šum.

Mjerni signal je kontinuirano promjenjiva veličina, po obliku odgovarajuća promjena mjerene veličine. Kontinuirani mjerni signal poznat je kao analogni signal, a pretvornik kao analogni pretvornik. U posljednje doba razvijeni su i pretvornici s diskretnim mjernim signalom, koji vrijednosti mjerene veličine daju u broječanom obliku. Takav se mjerni signal naziva još i digitalni pa se i za mjerni pretvornik upotrebljava pojam digitalni pretvornik.

Područje mjernog signala određeno je nacionalnim standardima koji su uglavnom međunarodno usklađeni. Proizvođači iz različitih zemalja nude mjerne pretvornike s podudarnim područjem mjernog signala ili, kako se skraćeno govori, s podudarnim izlazom. Tako standardizirana područja mjernog signala prilagođena su ulazima svih različitih sprava ili uređaja za postupanje signalima, ulazima pokaznih instrumenata, zapisnih sprava i dr. [1]

Izlazna impedancija karakterizira vladanje mjernog pretvornika kada je povezan s idućim stupnjem mjernog lanca, odnosno kada je opterećen. Impedancija izražava zavisnost sinusno promjenjive veličine (npr. napona, tlaka, sile) i druge pridružene veličine (npr. struje, brzine) koja je posljedica njezina djelovanja.

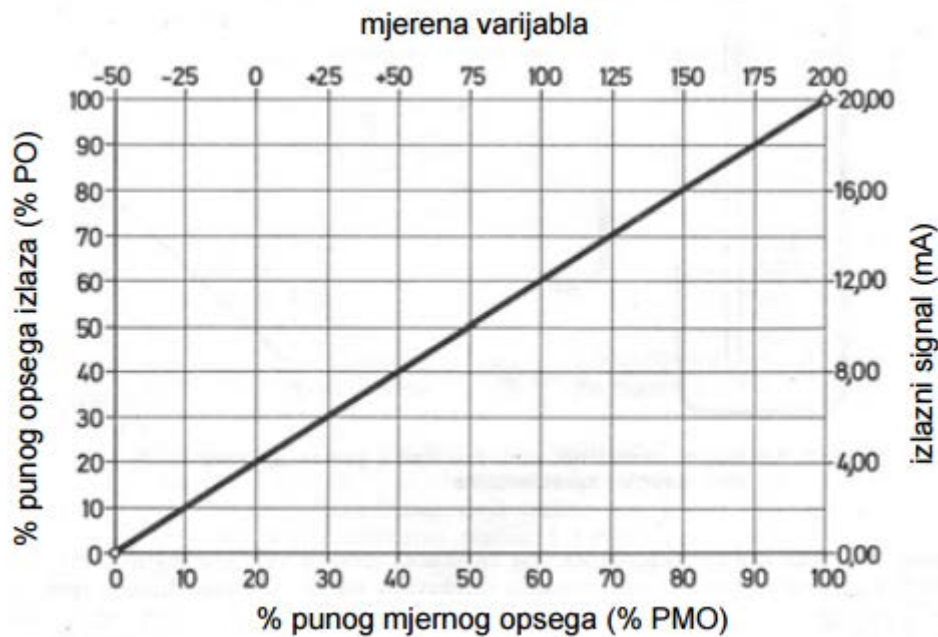
### 2.3.3 Prijenosne značajke

Prijenosne značajke obuhvaćaju sve različite pojedinosti zavisnosti mjernog signala od mjerene veličine. Mogu biti statičke i dinamičke.

*Statička karakteristika* je zavisnost mjernog signala  $y_m$  (izlazna veličina) o mjerenoj varijabli  $y$  (ulazna veličina).

$$y_m = f(y)$$

Statička karakteristika prikazuje se na način prikazan na slici 2-2., unutar granica mjernog područja. Na apscisi se nanose vrijednosti u postocima punog mjernog opsega (% PMO), a na ordinati vrijednosti u postocima punog opsega vrijednosti izlaznog signala (% PO).



Slika 2-2. Statička karakteristika mjernog pretvornika [1]

Stvarna statička karakteristika odstupa od idealne ili teorijske statičke karakteristike i piše se kao zavisnost

$$y_{ms} = y_m + \varepsilon_T$$

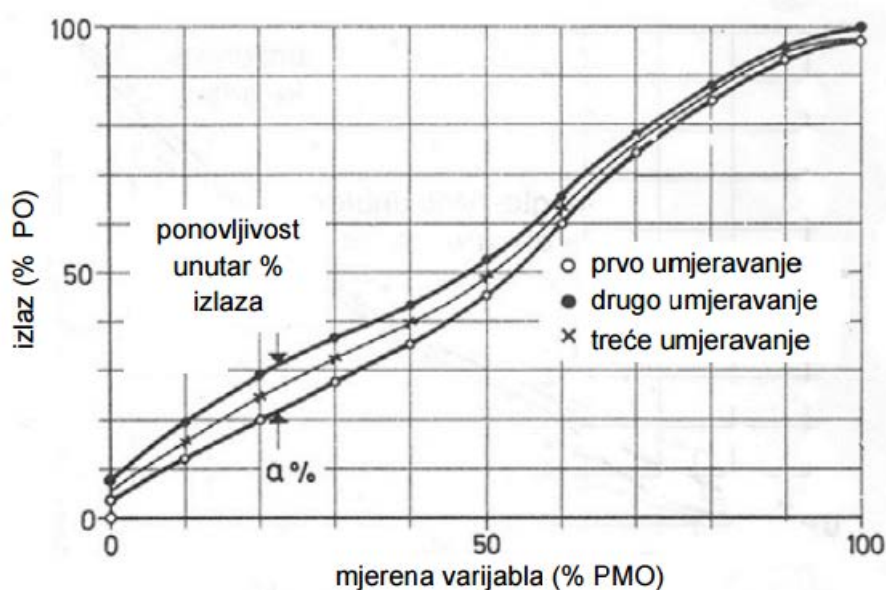
gdje sa  $y_m$  označavamo stvarnu vrijednost mjernog signala, a sa  $\varepsilon_T$  ukupnu pogrešku mjernog pretvornika. Pogreška mjernog pretvornika definira se kao algebarska razlika izmjerene vrijednosti i teorijske vrijednosti mjerene veličine.

*Linearnost* – blizina stvarne statičke karakteristike nekom referentnom pravcu. Izražava se postotkom kao najveće odstupanje neke baždarne vrijednosti od pripadajuće vrijednosti na pravcu. Pri tome je potrebno navesti o kojem se pravcu radi i na koje se baždarenje odnosi odstupanje. Većina je mjernih pretvornika izvedena tako da im je teorijska statička karakteristika linearna tj. pravac.

*Osjetljivost* – omjer promjene izlaznog signala i promjene mjerene veličine. Mjerna jedinica osjetljivosti definirana je jedinicama izlaznog signala podijeljenim jedinicama ulaznog signala; V/mV, V/°C, V/mm, itd. Što je veća promjena izlaznog signala za istu promjenu ulaznog signala, veća je osjetljivost mjernih pretvornika. Osjetljivost se definira pri ustaljenom tj. stacionarnom stanju.

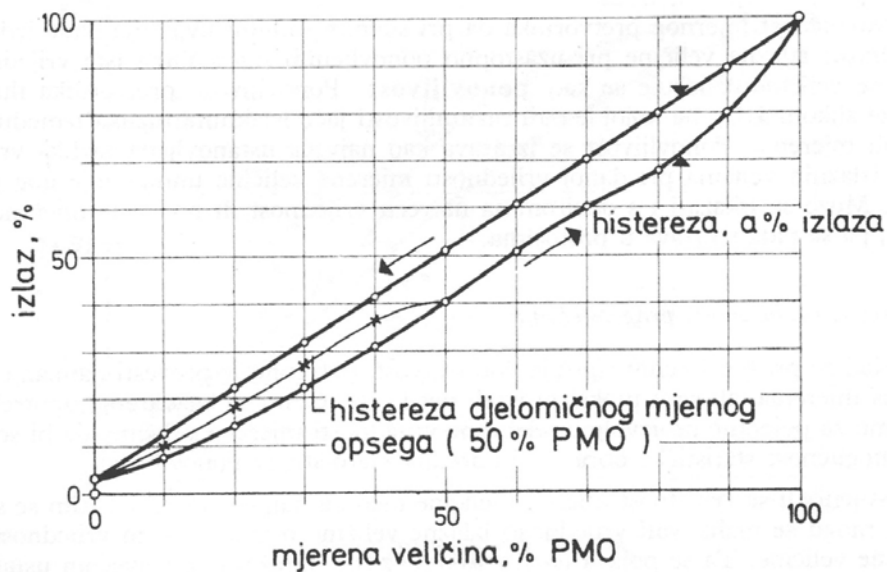
*Ponovljivost* – karakteristika mjernog pretvornika da pri stalnim radnim uvjetima daje jednake vrijednosti izlazne veličine pri uzastopno ponovljenim mjerenjima iste vrijednosti mjerene varijable. Izražava se kao najveća razlika vrijednosti izlaznih veličina pri danoj vrijednosti mjerne varijable unutar mjernog područja. Također se može izraziti s obzirom na najveću vrijednost ili područje mjerene veličine te se tada izražava u postocima.

*Obnovljivost* – karakteristika mjernog pretvornika da daje jednake vrijednosti izlazne veličine pri uvjetima okoline i različitim uređajima. Obnovljivost se izražava kao i prethodno opisana ponovljivost.



Slika 2-3. Ponovljivost mjernog pretvornika [1]

*Histereza* – razlika u vrijednostima izlazne veličine za istu vrijednost mjerene varijable kad se mjerena varijabla mijenja tako da najprije raste, a zatim se smanjuje. Izražava se najvećom ustanovljenom razlikom vrijednosti izlazne veličine ili u postocima punog opsega. Koristi se i izračunavanje histereze s obzirom na dio mjerenog područja. Histereza dijela mjerenog područja uvijek je manja od histereze ukupnog mjerenog područja.



Slika 2-4. Histereza mjernog opsega [1]

### 2.3.4. Sklad s okolinom

U praksi se uvjeti rada mjernog pretvornika razlikuju od normalnih ili sobnih radnih uvjeta pri kojima se izvodi proračun i baždarenje mjernog pretvornika. Takvi realni radni uvjeti nazivaju se okolišni uvjeti. Okolišni uvjeti su promjenjivi, pa povremeno mogu i znatno odstupati od normalnih uvjeta. Svojim djelovanjem uzrokuju pogrešku mjerenja, a mogu uzrokovati trajno oštećenje ili promjenu statičke karakteristike. Pri skladištenju, transportiranju, rukovanju i radu nastaju različite okolnosti pri kojima je mjerni pretvornik izvrnut takvim promjenjivim okolišnim uvjetima, pa se ovom pitanju posvećuje velika pozornost.

Ako je pri mjerenju poznata temperatura okoline, može se na osnovi poznatog sklizanja nule i sklizanja osjetljivosti provesti korekcija mjernih rezultata. Za svaki se mjerni pretvornik može baždarenjem odrediti i temperaturno područje. To je područje temperatura okoline pri kojem se pretvornik mora vladati u dopuštenim granicama pogreške, što znači da će pretvornik zadržati svoju statičku karakteristiku i onda kada je izložen bilo kojoj temperaturi unutar tog područja. Temperaturna pogreška je maksimalna promjena izlazne veličine koja nastaje kao posljedica izlaganja pretvornika graničnim temperaturama. Obično se u podacima o pretvorniku utjecaj pojedinih okolišnih uvjeta navodi kao osjetljivost pretvornika na promjene tih uvjeta: temperaturna osjetljivost, osjetljivost na vibracije, osjetljivost na elektromagnetsko polje itd. [1]

### **2.3.5. Pouzdanost**

*Pouzdanost* – sposobnost mjernog pretvornika za rad pod deklariranim uvjetima u određenom vremenskom razdoblju.

*Opterećenost* – skup utjecaja kojima je mjerni pretvornik izložen u određenom trenutku. Posebno je važna najveća dopustivost vrijednost mjerene veličine kojoj može biti izložen pretvornik, a da se kao trajna posljedica ne izazovu promjene njegove statičke karakteristike. Ta vrijednost se naziva dopustivo preopterećenje.

*Trajnost ili životni vijek* – najmanje vremensko razdoblje unutar kojeg se mjerni pretvornik može uskladištiti ili upotrijebiti da se pri tom bitno ne promijene svojstva. Važni pojedinačni pokazatelji trajnosti su skladišni vijek i radni vijek. Skladišni vijek je dopustivo trajanje skladištenja prije upotrebe, a radni vijek možemo definirati kao trajnost upotrebe mjernog pretvornika pri radnim uvjetima.

*Izvedbene značajke* – za svaki se mjerni pretvornik navode i neke od izvedbenih značajki važnih za ugradnju i primjenu kao što su: dimenzije, masa, podaci o ugradnji, izvedbe spojeva, materijal pretvornika, zaštita od korozije, itd. Na svim mjernim pretvornicima učvršćuju se natpisne pločice ili pločice s podacima.

## **2.4. POGREŠKE MJERENJA**

### **2.4.1. Tipovi pogrešaka**

Pogreške pri mjerenju generalno se klasificiraju kao slučajne i sistematične. Uglavnom svaka pogreška daje slučajnu i sistematičnu komponentu koja koristi kao nesigurnost izmjerene vrijednosti mjerene varijable. [3]

*Slučajna pogreška* - Trenutak i veličina varijable uzrokovane slučajnom promjenom su nepredvidivi. Međutim, obično slučajne pogreške prate određeni zakon statistike - normalnu distribuciju. Mjera slučajnih pogrešaka je time standardna devijacija distribucije. S povećanjem broja mjerenja iste količine, vrijednost standardne devijacije opada kao i vrijednost slučajnih pogreški.



*Sistematična pogreška* - Sistematične pogreške imaju određen smjer i veličinu. Takve pogreške su više problematične jer ih ponovljena mjerenja ne moraju nužno otkriti. Iako se i otkrije njihova postojanost, teško ih je nekada ukloniti. Zato se sistematične greške ne uzimaju za korekciju mjerenja, nego se uzimaju sa svojim cijelim vrijednostima skupa sa slučajnim pogreškama kao nesigurnost. Nekada se može uzeti teoretske metode za procjenu veličine sistematičnih pogreški.

## **2.4.2. Izvori pogrešaka**

### **1. Baždarenje uređaja**

Zbog čestog korištenja mjernog uređaja ili zbog njegovog starenja, instrumenti znaju biti neispravni i nebaždareni. Mjerenja s takvim uređajem će davati pogrešku. Ovakva vrsta pogreške može se svrstati u sistematičnu.

### **2. Obnovljivost mjernog uređaja**

Već je spomenuto što je pojam obnovljivosti, a upravo je pogreška mjerenja kada mjerni instrument nije obnovljiv, kada se nije koristio u uvjetima u kojima je baždaren. Mehanički nedostaci poput proklizavanja ili trenja u dijelovima uređaja vode ka pogrešci koja može biti slučajna ili sistematična.

### **3. Uređenja mjerenja**

Nekad uređenja mogu utjecati na mjerenja, primjerice Abbeov zakon koji kaže, da se pogreške prvog reda mogu izbjeći ako su mjerni uređaj i razmjerna os kolinearne.

### **4. Uzorak**

Priroda uzorka može dovesti do pogreške. Većina mehaničkih mjernih pretvornika su u kontaktu s uzorkom pod stalnim tlačnim uvjetima. Stoga će se tvrdi i mekani uzorci odazivati drugačije.

### **5. Uvjeti okoline**

Vlaga, tlak, temperatura, električna ili magnetska polja imaju jak utjecaj na mjereni instrument, a onda i na mjerenje, ako ti uvjeti nisu uzeti prilikom baždarenja.

## 6. Ljudski utjecaj

Unatoč automatizaciji, ljudski utjecaj često puta utječe na mjerenja. Činjenica je da će podaci mjerenja neke fizikalne veličine biti različiti od svakog tko ih mjeri. Takve pogreške mogu biti sistematične ili slučajne, što ovisi o uvjetima eksperimenta.

### 2.5. MJERENJE SILE

Kako je već opisano, sila je vektorska veličina i ima svoj smjer djelovanja. Stoga mjerenja sile uključuju određivanje iznosa i smjera.

Mjerenja sile mogu biti načinjena dvjema metodama:

*Direktna metoda* – uključuje direktnu usporedbu s poznatom gravitacijskom silom na nekoj masi, primjerice preko vage.

*Indirektna metoda* – uključuje mjerenja efekata sile na tijelo, primjerice mjerenje deformacije na elastičnom tijelu.

Mjerenje sile općenito se temelji na načelu ravnoteže sila i većina pretvornika sile gradi se posebnim osjetilom (elastičnim tijelom) u kojem se uspostavlja ravnoteža sila. Osjetilo tada pretvara mjerenu silu u mehaničku deformaciju. [1]

#### 2.5.1. Mjerni pretvornici sile

Kada mjerimo silu moguće je iskoristiti dvije posljedice elastične deformacije tijela izloženog djelovanju sile, a to su naprezanje i pomak. Iznos naprezanja i pomaka zavisi od oblika i načina učvršćivanja tijela, pa su razvijena tijela različitih oblika kao osjetila sile: gredice, žice, dijafragme, prstenovi i stupci. Izvode se iz homogenog materijala, obično čelika, fosforne bronce ili berilijeve bronce.

## 2.6 ODREĐIVANJE MASE PREKO NAPETOSTI ŽICE

Dizajn mjernog uređaja sastoji se od odabira prikladnog principa, odgovarajuće opreme, prikladnih baždarnih testova, kao i dobro osmišljenog plana kako će se dobivenim podacima rukovati te na kraju i prezentirati.[4]

Da bi se, kako je rečeno definicijom mjerenja, neku pojavu moglo opisati motrivom promjenom, treba poznavati temeljne fizikalne principe i veze između pojave i promjene. Odabir metode često ide u smjeru jednostavnosti izvedbe mjernog pretvornika, no često se puta u industriji zbog raznih vanjskih utjecaja uzima ona koja je više primjerena utjecajima. Veći broj metoda daje širinu izvedbe mjernih pretvornika te samog procesnog prostora koji traži primjenu tog pretvornika.

Poznavanje odnosa među unutrašnjim i vanjskim silama koje djeluju na neko tijelo daje nam mogućnost izrade mjernih pretvornika fizikalnih veličina koje su zastupljene u tim odnosima.

Kao primjer izrade uređaja sa mjernim pretvornikom sile, u ovom radu, uzima se frekvencijska vaga. Za izradu takvog mjernog uređaja moramo poznavati ovisnosti naprezanja, napetosti žice, gravitacijske sile te frekvenciju napete žice.

Navedene su dvije posljedice elastične deformacije tijela, a to su naprezanje i pomak. Naprezanje je fizikalna veličina kojom se opisuje unutarnja sila raspodijeljena po jedinici površine presjeka tijela nastala kao djelovanje vanjskih sila ili temperaturne promjene. Veličina naprezanja u nekoj točki tijela ne ovisi o elastičnim svojstvima materijala tijela, nego ovisi o veličini (dimenziji) i obliku tijela, veličini i raspodjeli vanjskog opterećenja, te orijentaciji presjeka kojem pripada točka tijela. [5]

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Za ovaj rad zanimljivo će biti uzdužno naprezanje što je djelovanje vanjske sile duž pravca najveće duljine izduljenog tijela, u ovom primjeru žice.

### 2.6.1. Napetost žice

Ako se zamisli žica koja visi jednim krajem sa zida na drugom kraju ima uteg mase  $m$ , te da tako mirno stoji, te da ne postoji više niti jedan vanjski utjecaj. Uteg napinje tu žicu svojom težinom, koja je jednaka umnošku mase i zemljine gravitacijske akceleracije ( $g$ ),

$$G = m * g$$

Pretpostavi li se da je to tijelo u ravnoteži, zaključuje se kako je sila napetosti žice ( $T$ ) upravo jednaka sili teže tog utega.

$$G = T$$

Kako je to jedina vanjska sila koja djeluje na žicu, zaključak je da je ona glavni čimbenik uzdužnog naprezanja žice. Kako je napetost žice jednaka po cijeloj udaljenosti žice, onda je i naprezanje u idealnom slučaju jednako u svim točkama na površini žice. Ta se unutarnja sila po površini presjeka može izjednačiti sa silom napetosti žice. Tom relacijom dobivamo vrijednost naprezanja žice kada je opterećena utegom.

### 2.6.2. Valovi na napetoj žici

Ako se u bilo kojoj točki nekog tijela proizvede poremećaj, on se prostire kao val. Ako se val na kraju tijela reflektira, na onom mjestu gdje je tijelo fiksno utvrđeno, onda dolazeći i reflektirajući val mogu graditi stojni transverzalni val, kao primjerice na gitari. Transverzalni valovi su oni kod kojih se djelići tijela kreću okomito na pravac prostiranja vala. Kreću se dakle svi u istoj ravnini. Kod transverzalnih valova uslijed fazne razlike oscilacija, izazvana pomicanja pojedinih djelića vezana su sa savijanjem i smicanjem sredne. Takva pomicanja se mogu vršiti samo u čvrstim tijelima pa su, stoga, transverzalni valovi mogući samo u čvrstim tijelima.[6]

U žici se može javiti samo ono titranje kod kojih je valna duljina

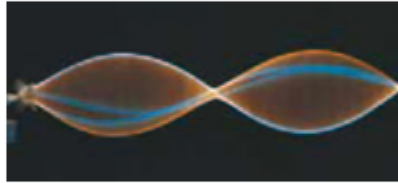
$$\lambda = \frac{2l}{n}$$

gdje  $n$  cijeli broj, a  $l$  duljina žice. Ako je primjerice  $\lambda = 2l$ , tj.  $n = 1$  onda imamo osnovno titranje, kod kojeg postoji samo jedan trbuh na sredini žice. Ostali titraji koji su mogući navedenom formulom zovu se *gornje (harmonijske) oscilacije*.

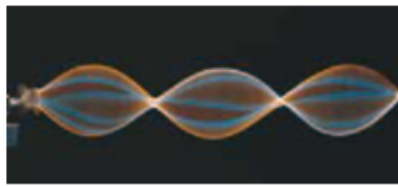
$$n = 1 \quad \lambda = 2L$$



$$n = 2 \quad \lambda = L$$



$$n = 3 \quad \lambda = \frac{2}{3}L$$



Slika 2-5. Osnovno titranje i gornje harmonijske oscilacije [7]

Brzina transverzalnog vala definirana je svojstvima materijala žice te napetosti. Brzina na napetoj žici iznosi:

$$v = \sqrt{\frac{T}{\rho_l}}$$

gdje je  $T$  sila zatezanja (napetosti), a  $\rho_l$  linijska masa žice (duljinska gustoća).

Frekvencija je nadalje odnos brzine i valne duljine i iznosi:

$$v = \frac{v}{\lambda}$$

Uvrste li se nadalje prethodni izrazi za brzinu i valnu duljinu u jednadžbu za frekvenciju, dobivamo odnos koji kaže, da je svaka sljedeća frekvencija ( $n = 1, 2, \dots$ ), *harmonik* osnovne frekvencije  $\nu_1$ :

$$v = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{T}{\rho_l}}$$

U realnom sustavu katkada frekvencije ne prate ovakvu teoretsku osnovu. Kao primjer uzima se žica kojoj linijska gustoća nije konstantna po cijeloj dužini. Žice piana ili violine aproksimativno, ali ne i isključivo, prate ovakav harmonijski niz. To se pripisuje tome što žice nisu idealno fleksibilne. [8]

Da je brzina širenja vala na žici ovisna o sili naprežanja i duljinskoj gustoći, da se vrlo lako objasniti. Uzme li se komad gumene cijevi i postavi na dva fiksna kraja, pobudi li se titranje na njoj, moguće je pratiti kako se valovi gibaju. Nategne li se zatim malo jače tu gumu vidjet će se da povećanjem napetosti valovi postaju sve brži.

Još je jedan način određivanja brzine vala i njenim ovisnostima - *sonometrom*. Na sonometru je komad žice nategnut masom poznatog utega te se provjerava frekvencija napete žice usporedbom sa setom zvučnih viljuški. [9] Posebno je zanimljiv princip rada sonometra jer se temelji na teoriji na kojoj se temelji i ova frekvencijska vaga.

Dalje o teoriji valova ne mora se duljiti, jer su obrađene bitne osnove. Sve ostale stvari mogu se naći u stručnoj literaturi navedenoj na kraju ovog rada.

### 2.6.3. Masa iskazana frekvencijom napete žice

Na početku ovog odjeljka potrebno je ponoviti proširenu jednadžbu za frekvenciju:

$$v = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{T}{\rho_l}}$$

Ono što je dosad pokazano jest to da frekvencija ovisi o brzini vala te o valnoj duljini, te također da brzina vala ovisi o svojstvima materijala, sili napetosti, a valna duljina o dužini žice. Kako je prije toga napetost (tenziju) na žici koja visi sa zida opterećena utegom mase  $m$  izjednačena sa silom teže na uteg,  $G = mg$  slijedi:

$$v = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{G}{\rho_l}}$$

a onda i:

$$v = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{mg}{\rho_l}}$$

Iz dobivene jednadžbe dobivamo relaciju između frekvencije napete žice i mase ovješene na žicu, što je temelj principa rada frekvencijske vage.

Kako se u mjerenju na vagi koristi samo jedna žica, pretpostavlja se da je duljinska gustoća  $\rho_l$  konstantna. Također, za svako mjerenje će duljina žice  $l$  ostati nepromijenjena, a tom logikom i  $n$ . Također, ubrzanje sile teže  $g$  je isto tako konstantno. Jednažbu je nadalje moguće transformirati na sljedeći način:

$$v = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{mg}{\rho_l}}$$

$$v = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{g}{\rho_l}} * \sqrt{m}$$

A onda i konstantne vrijednosti staviti u konstantu, koja se u ovom radu naziva  $Z$ , jer u literaturi nije nađena slična. Jednažba će poprimiti svoj konačan oblik:

$$v = Z * \sqrt{m}$$

odnosno:

$$\frac{v}{\sqrt{m}} = Z$$

U ovom trenutku može se vidjeti zavisnost dvaju ovdje bitnih varijabli. Da bi se ovu teoriju potvrdilo, empirijski su na ovom uređaju određene prva masa i frekvencija, a onda su sukladno formuli izjednačene dvije jednadžbe, i za sljedeću poznatu masu  $m_2$  teoretski izračunata frekvencija na način:

$$\frac{v_1}{\sqrt{m_1}} = Z = \frac{v_2}{\sqrt{m_2}}$$

iz čega:

$$v_2 = \frac{v_1 \sqrt{m_2}}{\sqrt{m_1}}$$

Rezultat takvog poluempirijskog, kao i čistog empirijskog pristupa obradit će se u nastavku.

## **3. EKSPERIMENTALNI DIO**

### **3.1. FREKVENCIJSKA VAGA**

Vaganje mase bilo kakvog uzorka jedno je od najraširenijih mjerenja. Od kuhara sa kuhinjskim vagama, do analitičkih i industrijskih vaga, metode vaganja usavršene su gotovo u cijelosti, za potrebu za koju služe. Frekvencijska vaga kakva se u nastavku analizira možda nije jedna od raširenijih, ali je vrlo zanimljiv i edukativan uređaj. Princip izračunavanja mase iz frekvencije napete žice u sebi sadrži niz fizikalnih pojava. Od same sile teže, preko napetosti žice, naprezanja u žici, valova, titranja i frekvencije mogu se međusobno dovesti u ovisnost te tako ispitati svojstva. U radu je naravno izvedena i metoda rada mjernog pretvornika sile, što je u fokusu ovog rada. Kako u literaturi nije nađen osnovni princip izrade i metoda rada ovakvog uređaja, to je ovaj posao učinio znanstvenim istraživanjem u punom smislu riječi. Nakon razvoja teorijske osnove, napisane u prethodnom poglavlju, do izrade uređaja, opisane u nastavku, korišteno je stečeno znanje i inženjersko iskustvo.

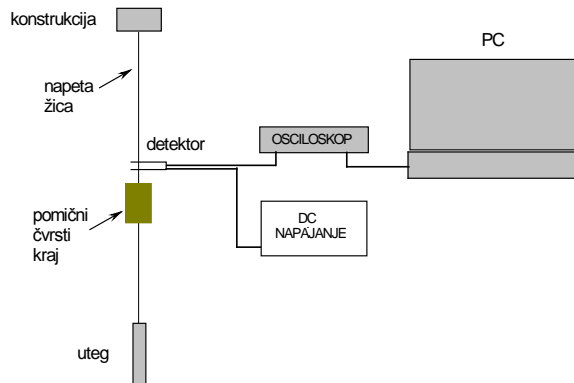
Frekvencijska vaga ovakve izrade može se koristiti za mjerenje na razini industrije u određenim uvjetima u kojem je potrebna zbog svoje robusnosti. Ovakva izrada ima svoje pozitivne strane, no i negativne, koje bi se dale ukloniti detaljnijom analizom i konstrukcijom, ako za to ima potrebe. U laboratorijskim uvjetima naišlo se na niz prepreka pri izradi vage, pa je tako postojala mogućnost pogrešaka u rezultatima zbog nesavršene izvedbe aparature.

Ovaj rad na kraju služiti će prije svega kao edukativan uvid u metodu određivanja mase na jedan nekonvencionalan način, te otvoriti pitanja veze frekvencije i mase, kao i nekih drugih ovdje ne obrađenih svojstava takvog sustava.



## 3.2. APARATURA

Aparatura se sastoji od utega poznate mase, metalne žice, pomičnog čvrstog kraja, detektora, osciloskopa, pokazivača frekvencije, te metalne konstrukcije i napajanja što se vidi na slici 3-1.



Slika 3-1. Shema aparature

### 1. Utteg

Utteg poznate mase potreban je kako bi se instrument umjerio prateći teoretsku formulu. Također utezi poznatih masa koristili su se pri izradi baždarnog dijagrama ovog instrumenta.

### 2. Metalna žica

Metalna žica je u centru pažnje ovog uređaja. Na njoj se događa naprezanje od strane uttega, te mjerenje titraja. Korištena je metalna žica debljine 0.279mm, od legure ugljičnog čelika. Na točno određenom dijelu žice označen je i postavljen pomični čvrsti kraj. Bitno je za žicu da može podnijeti maksimalnu napetost kojim je opterećena za vrijeme mjerenja.

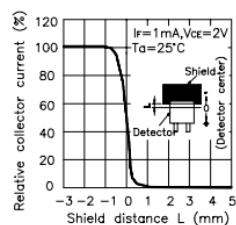
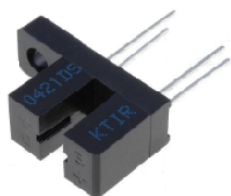
### 3. Pomični čvrsti kraj

Pomični čvrsti kraj na donjoj strani žice definirao je konstantnu duljinu žice. Duljina žice je stoga konstantna tijekom cijelog mjerenja jer o njoj ovisi frekvencija. Označeno je mjesto na žici gdje se nalazi pluteni čep, što je tijekom mjerenja

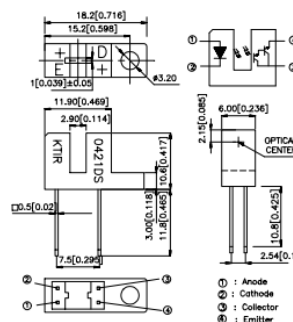
provjeravano. Čep je naknadno fiksiran metalnom konstrukcijom i dobro zategnut. Kako je napetost žice na svim dijelovima jednaka, nakon što žica napeta određenom masom, fiksiran je i zategnut čep. Tako je dobiven odvojen dio žice poznate duljine, a uklonjena je eventualna pogreška prilikom njihanja utega.

#### 4. Detektor

Kao detektor titranja žice korišten je optički detektor KTIR 0421 DS, marke *Kingbright* koji se koristi kao optički prekidač. Sastoji se od infracrvenog odašiljača i foto-tranzistora koji dočekuje infracrvenu svjetlost. Oba se nalaze na optičkoj osi, radnog područja  $2.9 \times 0.5$  mm. U detektoru je ugrađen filter vidljivog spektra.[10]



Parameter		Symbol	Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
Input	Forward voltage	$V_f$	$I_f=20\text{mA}$	—	1.7	1.5	V
	Peak forward voltage	$V_{HF}$	$I_{HF}=0.5\text{A}$	—	2	1	V
	Reverse current	$I_R$	$V_R=5\text{V}$	—	—	10	$\mu\text{A}$
Output	Collector dark current	$I_{CDO}$	$V_{CE}=10\text{V}, I_E=0\text{mA}$	—	—	$10^6$	A
Transfer characteristics	Current transfer ratio	GTR	$V_{CE}=2\text{V}, I_E=1\text{mA}$	—	650	—	%
	Collector-emitter saturation voltage	$V_{CE(sat)}$	$I_E=2\text{mA}, I_C=1\text{mA}$	—	—	1.0	V
	Response time	Rise time	$t_r$	$V_{CE}=5\text{V}, I_E=10\text{mA}$	—	90	100
Fall time		$t_f$	$R_L=100\Omega$	—	80	300	$\mu\text{sec}$



Slika 3-2. Izgled, shema i specifikacije detektora KTIR 0421 DS [10]

#### 5. Osciloskop

Osciloskop je električni uređaj koji stvara dvodimenzionalni graf jedne ili više električnih potencijalnih razlika u vremenu na vodoravnoj liniji, te električni signal na okomitoj liniji. [11]

Uporabljjen je osciloskop TiePie HS3 koji ima niz načina korištenja. PC USB osciloskop TiePie HS3 korišten je za akviziciju podataka u zadanom vremenu.

## 6. Pokazivač frekvencije

Kao pokazivač frekvencije koristili smo softver osciloskopa na prenosnom računalu. Naknadno su na računalu obrađivani podaci.

## 7. Metalna konstrukcija

Metalna konstrukcija, ili bilo kakva druga, a da je dovoljno čvrsta za potrebe uređaja, od velike je važnosti. Na metalnoj konstrukciji na vrhu pričvršćena je žica, te je također pričvršćen pomični čvrsti kraj, kao i detektor titraja.

Bitno je uopće za funkcioniranje aparature da je konstrukcija dovoljno čvrsta da ne podlegne težini utega, a na dijelu pomičnog čvrstog kraja da može izdržati napetost žice, kako bi mjerenje bilo točnije.

### **3.3. IZRADA UREĐAJA I PRIPREMA MJERENJA**

Za izradu uređaja postojala je nekolicinu zahtjeva. Položaj žice zahtijevao je takvu izvedbu da što manje bude zaklonjen osloncima kako bi težina utega bila direktno suprotna samo sili napetosti na žici. Donji čvrsti kraj žice mogla je biti kuka na kojoj su bili utezi, međutim umjesto toga stavljen je pomični čvrsti kraj iznad polovice žice kako njihanje i rotacija utega ne bi utjecala na mjerenje, jer je položaj detektora nije mijenjan. Kada bi se žica njihala postojala bi mogućnost da izlazi iz radnog područja detektora. Držeći se za to da je masa na žici jednako raspodijeljena, te samim time i napetost, na pomični čvor postavljen je pluteni čep. Označeno je mjesto konstantne duljine žice, te nakon što bi se žica napela zbog utega, zategnut je pluteni čep na tom mjestu. Debljina metalne žice nije bila dovoljno velika da bi zakrila signal detektora, pa je detektor modificiran netransparentnim tamnim materijalom koji je pokrio veći dio „prozora“ foto-tranzistora, kako bi se i najmanje zaklanjanje moglo registrirati. Ostali dio opreme (elektronički) složen je po preporučenim specifikacijama.

U pripremi za mjerenje izvagani su utezi za baždarenje. Izmjerena je temperatura okoline u kojoj se odvija mjerenje.

### 3.4. OPIS RADA

Za početak potrebno je upaliti svu elektroničku opremu, provjeriti da li je žica u radnom području detektora, postaviti pluteni čep na prije postavljenu oznaku za duljinu žice, te prilagoditi metalnu konstrukciju tome. Očitati temperaturu u prostoriji.

Utege, prethodno izvagane na laboratorijskoj vagi, objesiti na kuku žice, te pričekati trenutak ukoliko se jako zanjiše. Tada provjeriti pluteni čep još jednom, da li je na konstantnoj dužini žice te ga dobro zategnuti metalnom štipaljkom koja se nalazi na metalnoj konstrukciji. Tada je bilo potrebno pobuditi titranje na žici, laganim trzajem drvenim štapićem. Nije bitno kojeg je materijala štapić, no bitno je da trzaj bude dovoljno prepoznatljiv detektoru. Nakon trzaja žice, na softveru osciloskopa praćeno je titranje žice te su podaci spremljeni u datoteku.

Ovu je proceduru trebalo pratiti za sve utege poznate mase, kako bi se dobio baždarni dijagram uređaja. Umjeravno je od najmanje do najveće mase utega (100 g – 5080 g), te povratno od najveće do najmanje mase. Nakon toga izmjerena su dva utega nepoznate mase kako bismo mogli provjeriti točnost uređaja.

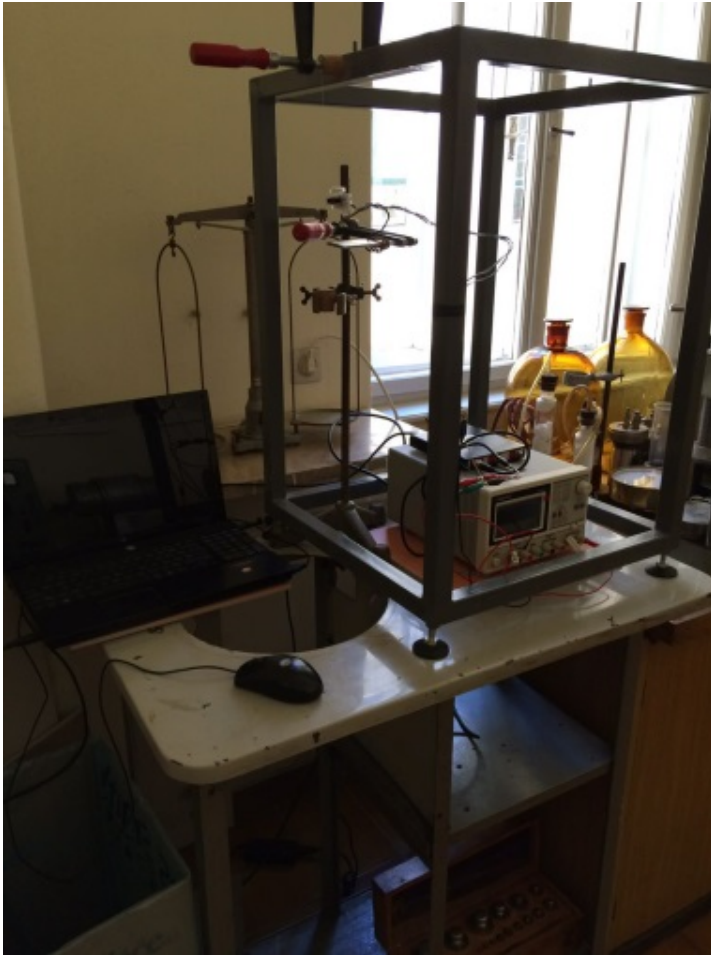
Nakon spremanja svih podataka potrebno je podatke obraditi kako bi se dobile vrijednosti frekvencija za mjerene mase.



Slika 3-3. Izgled aparature tokom mjerenja

## 4. REZULTATI I RASPRAVA

Radi lakšeg komentiranja dobiveni rezultati će se ujedno i raspraviti.



Slika 4-1. Izgled aparature tokom mjernja

## 4.1. PRIKAZ REZULTATA

Tablica 1. Rezultati mjerenja frekvencije poznatih masa

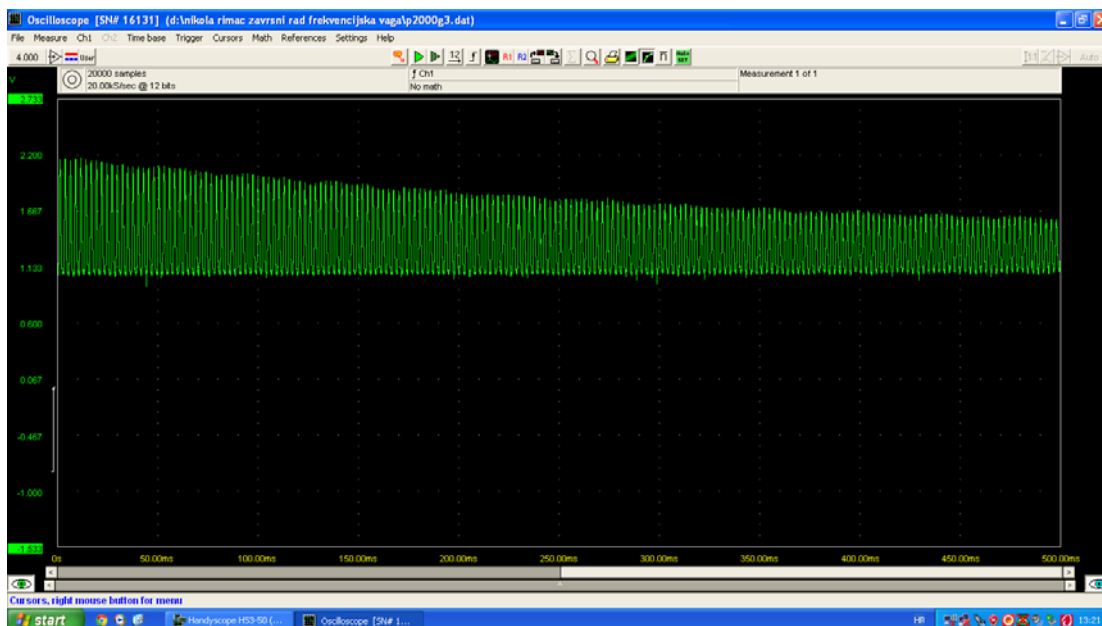
masa/g	f / Hz	f / Hz	f / Hz	f <sub>srednja</sub> / Hz
100g1 100g2 100g3	108.00±0.01	109.98±0.01	112.50±0.01	110.16
200g1 200g2 200g3	135.94±0.01	136.35±0.01	136.75±0.01	136.35
300g1 300g2 300g3	170.98±0.01	171.63±0.01	171.32±0.02	171.31
400g1 400g2 400g3	188.31±0.01	189.40±0.02	189.82±0.03	189.18
500g1 500g2 500g3	191.00±0.01	191.51±0.03	192.17±0.02	191,56
1000g1 1000g2 1000g3	262.26±0.02	260.80±0.01	261.53±0.02	261,53
2000g1 2000g2 2000g3	393.16±0.01	392.70±0.01	392.66±0.01	392,84
3000g1 3000g2 3000g3	484.32±0.01	483.95±0.02	489.56±0.01	485,94
4000g1 4000g2 4000g3	555.08±0.01	554,08±0.01	553.76±0.01	554,31
5080g1 5080g2 5080g3	619.46±0.02	622.49±0.02	621.19±0.03	621,05
4000g1 4000g2 4000g3	561.80±0.05	561.75±0.05	561.18±0.04	561.58
3000g1 3000g2 3000g3	479.72±0.04	479.75±0.01	479.89±0.01	479.79
2000g1 2000g2 2000g3	383.44±0.01	384.10±0.03	384.64±0.01	384.06
1000g1 1000g2 1000g3	256.03±0.01	255.91±0.01	256.80±0.01	256.25
500g1 500g2 500g3	183.23±0.02	183.35±0.03	183.33±0.03	183.30
400g1 400g2 400g3	175.22±0.01	175.23±0.01	174.61±0.01	175.02
300g1 300g2 300g3	143.78±0.02	144.71±0.03	144.92±0.02	144.47
100g1 100g2 100g3	128.11±0.05	126.70±0.02	123.84±0.05	126.22

U tablici 1., navedene su vrijednosti frekvencija za ulazne vrijednosti masa te srednja vrijednost tri mjerenja. Pri umjeravanju uziman je set od tri podatka za svaku ulaznu masu. Prva veća greška dogodila se kod mase 200 g u slučaju opadanja mjerene varijable, odnosno mase. Vrijednost frekvencije pri masi od 200 g iznosila je 72,61 Hz . Ta je vrijednost u danjim proračunima histereze izbačena. Pretpostavka je da je došlo do pogreške uslijed namještanja pomičnog čvrstog čvora, točnije greške ljudskog faktora.

## 4.2. OBRADA REZULTATA

### 4.2.1. Određivanje frekvencija

Nakon trzaja žice, preko detektora, mjerni uređaj na ekranu računala pokazao je promjenu napona uslijed zaklanjanja optičkog detektora, kao promjenu napona u vremenu. Skup podataka spremljen je na računalo za daljnju obradu. Periodička promjena, odnosno valovi, obrađeni su u programu Origin 7.5.



Slika 4-2. Grafičko sučelje softvera osciloscopa



Slika 4-3. grafičko sučelje analizatora spektra

Tokom eksperimenta prikupljen je velik broj podataka, međutim u nastavku je obrađena odabrana manja količina kao reprezentativni uzorak obrade.

Tablica naponskih maksimuma datoteke 100g1.DAT, nastala je primjenom funkcije „Pick Peaks“. Prvi stupac sadrži redni broj podatka, drugi stupac odgovara vremenu pojave maksimuma u sekundama, treći stupac pokazuje maksimalni napon u voltima, dok je četvrti stupac redni broj određenog naponskog maksimuma. Vrijednost frekvencije određena je na dva načina.

U vremenu od  $(0.48935 - (-0.094)) = 0.58335$  s javljaju se 63 puna titraja, što odgovara frekvenciji titraja od 108.0 Hz

U tablici 2. prikazana je cijela tablica naponskih maksimuma datoteke 100g1.DAT, kao uvid u dobivene vrijednosti.

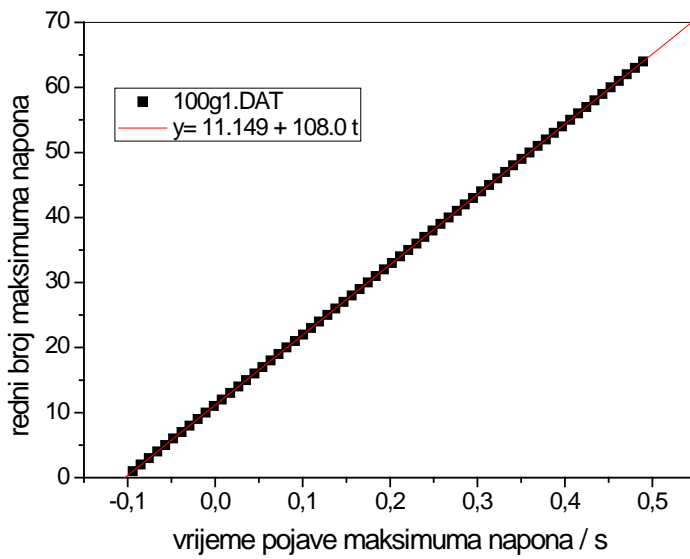
Tablica 2. Naponski maksimumi datoteke 100g1.DAT nastali primjenom funkcije „Pick Peaks“

Redni br. podataka	Vrijeme pojave naponskog maksimuma	Maksimalni napon	Redni br.naponskog maksimuma
8121	-0,094	2,43757	1
8301	-0,085	2,45125	2
8487	-0,0757	2,44148	3
8680	-0,06605	2,47664	4



8861	-0,057	2,44734	5
9045	-0,0478	2,44734	6
9234	-0,03835	2,43562	7
9415	-0,0293	2,4825	8
9606	-0,01975	2,42976	9
9783	-0,0109	2,43562	10
9973	-0,0014	2,42	11
10157	0,0078	2,41804	12
10346	0,01725	2,4239	13
10532	0,02655	2,40632	14
10711	0,0355	2,40242	15
10902	0,04505	2,40437	16
11085	0,0542	2,41023	17
11273	0,0636	2,42	18
11454	0,07265	2,41609	19
11637	0,0818	2,40046	20
11825	0,0912	2,39656	21
12015	0,1007	2,38288	22
12196	0,10975	2,41804	23
12378	0,11885	2,41023	24
12568	0,12835	2,40046	25
12752	0,13755	2,3946	26
12941	0,147	2,38679	27
13124	0,15615	2,38484	28
13307	0,1653	2,38679	29
13496	0,17475	2,37507	30
13678	0,18385	2,36335	31
13862	0,19305	2,3614	32
14047	0,2023	2,34187	33
14232	0,21155	2,3321	34
14417	0,2208	2,31452	35
14604	0,23015	2,30476	36

14790	0,23945	2,28913	37
14978	0,24885	2,28913	38
15158	0,25785	2,30281	39
15341	0,267	2,28327	40
15530	0,27645	2,29304	41
15713	0,2856	2,28132	42
15898	0,29485	2,29499	43
16085	0,3042	2,28327	44
16270	0,31345	2,26765	45
16455	0,3227	2,25202	46
16639	0,3319	2,2364	47
16818	0,34085	2,20124	48
17010	0,35045	2,18952	49
17193	0,3596	2,17194	50
17381	0,369	2,16804	51
17568	0,37835	2,1446	52
17750	0,38745	2,13092	53
17935	0,3967	2,14264	54
18122	0,40605	2,14069	55
18304	0,41515	2,13874	56
18491	0,4245	2,13288	57
18677	0,4338	2,13483	58
18860	0,44295	2,10358	59
19049	0,4524	2,10358	60
19233	0,4616	2,08209	61
19414	0,47065	2,086	62
19601	0,48	2,07233	63
19788	0,48935	2,06061	64



Slika 4-4. Ovisnost rednog broja maksimuma napona o vremenu pojave maksimuma napona

Drugi način je grafički prikaz podataka iz tablice, ovisnost rednog broja maksimuma napona o vremenu pojave naponskog maksimuma, na osnovi kojeg se također može odrediti frekvencija titranja žice,  $f$  / Hz, a koja je jednaka koeficijentu smjera pravca.

Datoteka: 100g1.DAT  
 Linear Fit  $Y = A + B * X$

Parameter	Value	Error
A	11,14956	0,00259
B	108,00439	0,0099

R	SD	N	P
1	0,01355	64	<0.0001

Datoteka 100g2.DAT

Parameter	Value	Error
A	10,04736	0,00196
B	109,98086	0,00759

R	SD	N	P
1	0,01021	64	<0.0001

Datoteka 100g3.DAT

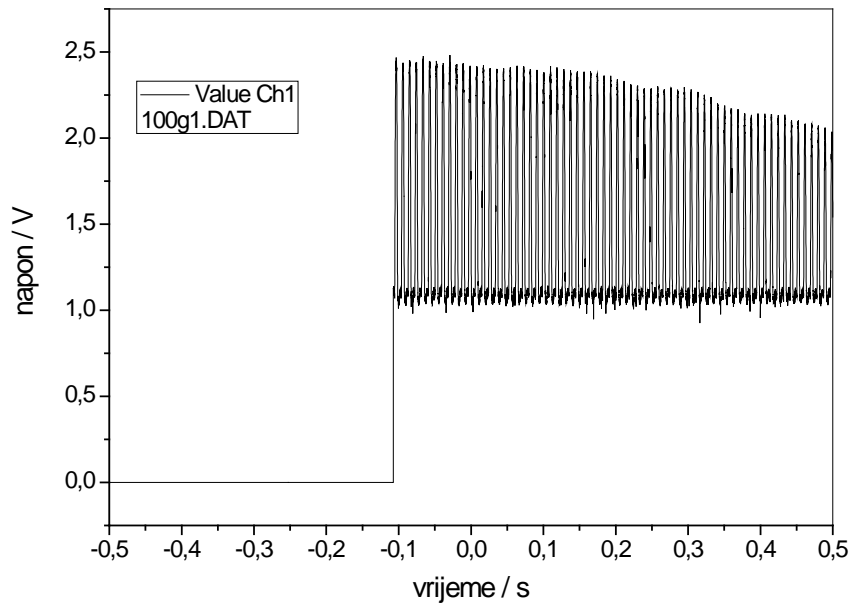
Parameter	Value	Error
A	11,84386	0,0017
B	112,49951	0,00652

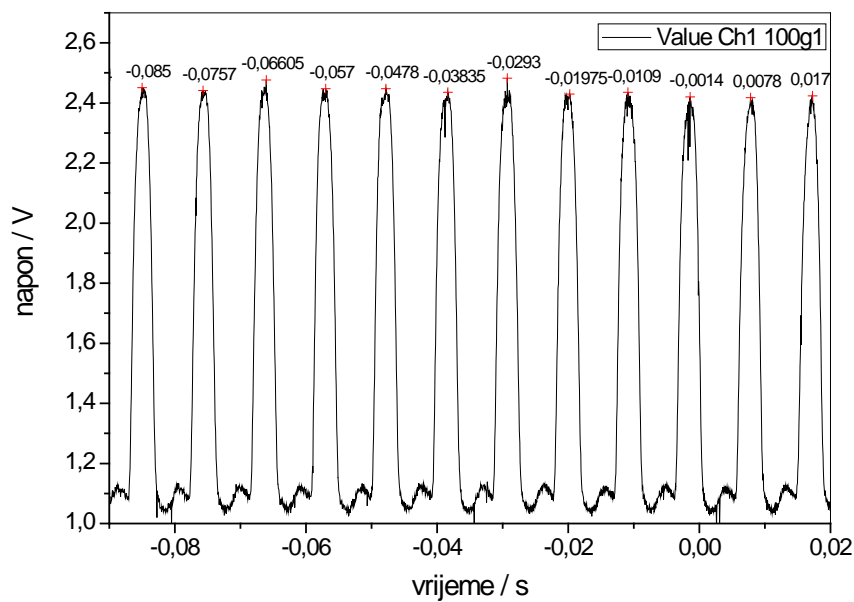
R	SD	N	P
1	0,00917	67	<0.0001

Slika 4-5. parametri funkcije za datoteku 100g2.DAT

Na slici 4-5., su prikazane vrijednosti parametara funkcije ovisnosti (pravac) rednog broja maksimuma napona o vremenu pojave naponskog maksimuma za svako od mjerenja, gdje je naznačen parametar B, koji odgovara nagibu pravca, tj. frekvenciji titranja.



Slika 4-6. Eksperimentalni rezultat ovisnosti napona optičkog senzora o vremenu, uz masu utega od 100 g (prvo ponavljanje), datoteka 100g1.DAT.



Slika 4-7., Detalj naponskog signala optičkog senzora

Detalj naponskog signala optičkog senzora uz masu utega od 100g (prvo ponavljanje). Prikazano je vrijeme pojave maksimuma napona na osnovi kojeg je određena frekvencija titranja od 108.0 Hz.

#### 4.2.2. Određivanje značajki mjernog pretvornika

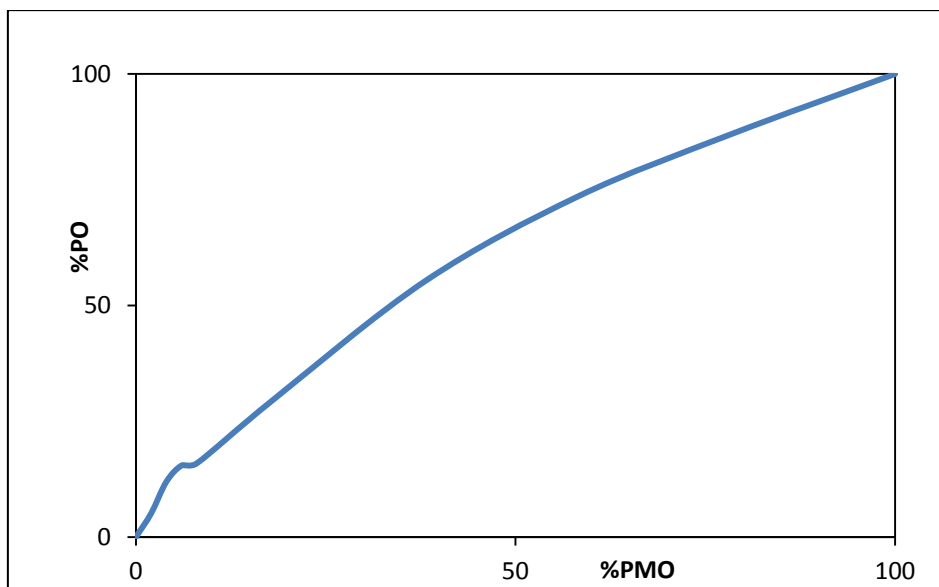
Nakon što su određene frekvencije kao izlazne vrijednosti, za ulazne vrijednosti mase, potrebno je odrediti značajke mjernog pretvornika.

Na početku treba raspraviti o samom mjernom pretvorniku sile. Mjerni pretvornik sile iz napetosti žice, odnosno signalom titranja napete žice daje periodički signal napona u vremenu. Po toj logici, ulazna vrijednost jest sama sila napetosti žice, međutim kako je teorijom rečeno, ona je jednaka težini utega mase  $m$ . Kako je tijekom mjerenja ubrzanje sile teže konstantno, možemo zaključiti da napetost žice direktno ovisi o masi utega. Stoga će u nastavku, kao ulazna veličina u mjerni pretvornik postaviti masa utega. Trebalo bi nadalje razmotriti izlaznu vrijednost iz mjernog pretvornika, odnosno naponski signal u vremenu. Slijedeći logiku o ulazu, tu izlaznu vrijednost moguće je definirati nekom drugom o njoj zavisnoj veličini kako bi izračun bio lakši. Prethodno je objašnjena veza naponskog signala i frekvencije te će se uzeti u obzir postavljajući frekvenciju kao izlaznu vrijednost. Vidi se, dakle, da se ovdje radi o više pretvaranja varijabli, no ovdje u osnovi ostaje mjerni pretvornik sile. Dotakli smo se prethodno ulaznih značajki te definirali masu utega kao mjerenu varijablu. Mjerno područje varijable je od 100g do 5080g, a mjerni opseg je razlika gornje i donje vrijednosti  $MO = 4980$  g.

Mjerni signal je napon u voltima, koji je funkcijski vezan s frekvencijom, odnosno izlaznom varijablom. Područje mjernog signala definirano je ulaznim naponom od 1.5V, što je vidljivo iz slike[4-6], gdje se vidi i offset od 1V. Mjerni opseg izlaznog signala definirat ćemo preko frekvencije kao izlazne veličine pa će tako iznositi 510,98 Hz. Mjerna informacija se prenosi, dakle, naponskim signalom, a po vjernijem predočenju stvarnog iznosa mjernog signala spram pravog iznosa mjernog signala potrebni su detaljniji proračuni. Slučajnih kolebanja mjerene varijable nije bilo u tolikoj mjeri, a jedina pojava koja bi se mogla opisati kao šum signala je bila prilikom krivo postavljene opreme gdje je žica unutar jednog titranja dvaput zatvorila optičku os detektora i tako dala dva maksimuma napona („peak-a“). Takva smo mjerenja odmah odbacivali, te prilagodili opremu i ponovno mjerili.

Statičku karakteristiku definirali smo ovisnošću frekvencije, o masi, što je i grafički prikazano (slika 4-8). Vidljivo je da ovisnost nije linearna, što i prati teorijsku vezu da je:

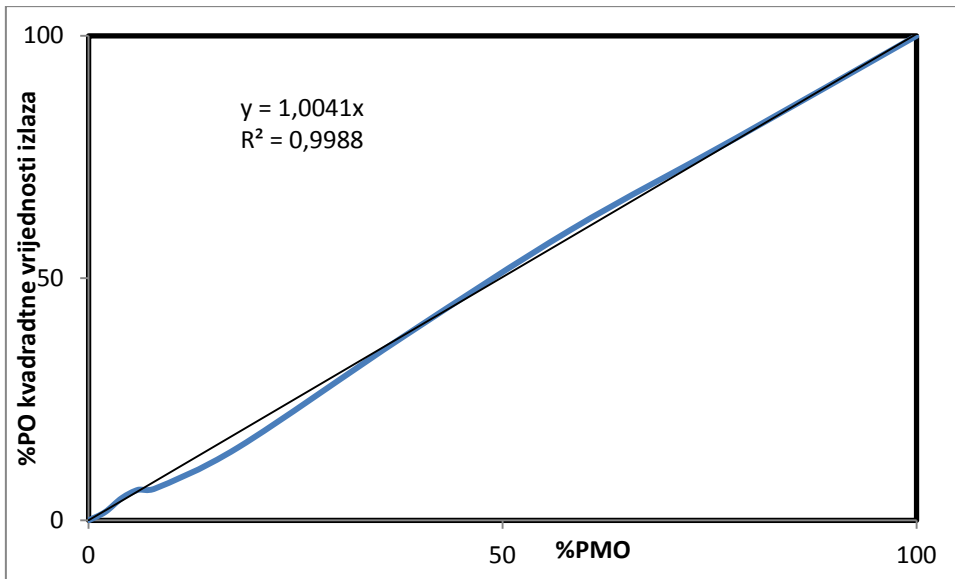
$$v = Z * \sqrt{m}$$



Slika 4-8. Statička karakteristika mjernog pretvornika

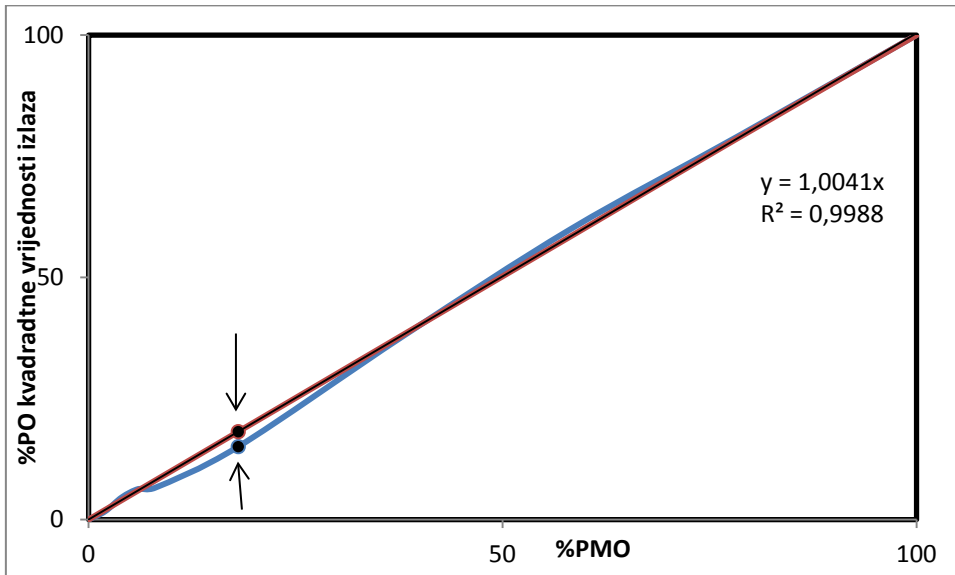
Vidljivo je da se u području nižih masa javljaju odstupanja što je moguće pripisati pogrešci ljudskog faktora pri mjerenju. Za određivanje teoretske statičke karakteristike potrebno je poznavati, između ostaloga, svojstva materijala žice, sadržanu u konstanti  $Z$  (str. 16) što je prilikom izrade ove aparature zanemareno. Pitanje svojstva materijala žice jedno je od ključnih za ovakav uređaj, ali opsežnost tog dijela zahtjeva cijeli jedan istraživački rad za sebe. U nastavku će se površno dotaknuti to pitanje, kako bi se otvorile smjernice za daljnja istraživanja.

Kako bi se olakšala primjena, statička karakteristika je linearizirana kvadriranjem vrijednosti izlaza, te je prikazana grafički. U nastavku će se za određivanje ostalih značajki služiti takvom modificiranom statičkom karakteristikom. Linearizirana statička karakteristika dopušta kreiranje referentnog pravca funkcije  $y = 1.0041x$ , preko kojeg je dalje određena linearnost mjernog pretvornika.



Slika 4-9. Linearizirana statička karakteristika

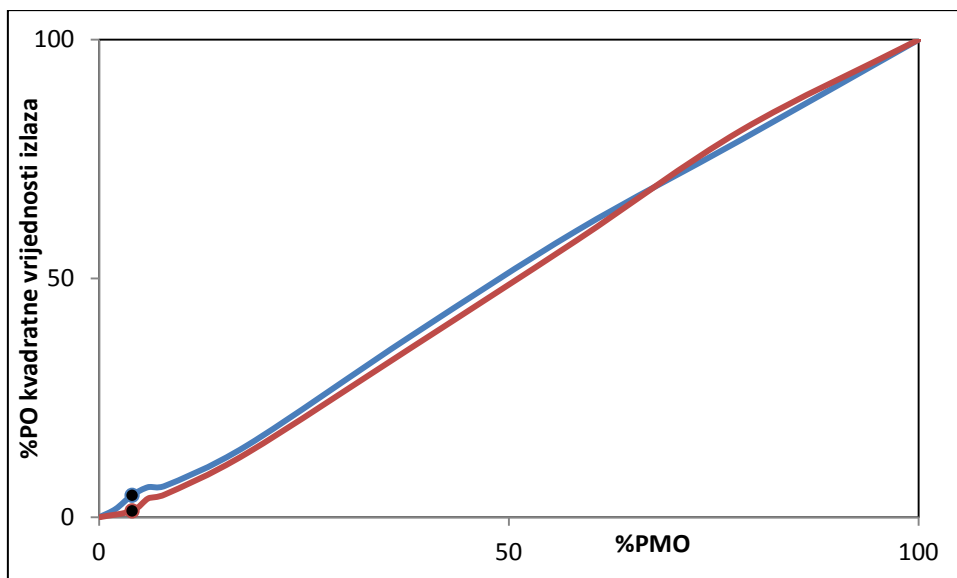
Iz statističke karakteristike izračunata je linearnost. Linearnost iznosi 3.09% mjernog opsega kvadrata izlaza.



Slika 4-10. Najveće odstupanje baždarne vrijednosti – linearnost

Histereza je izračunata i iznosi 3,27% %PO kvadratne vrijednosti izlaza





Slika 4-11. Histereza mjernog pretvornika

Osjetljivost, kao i ponovljivost ikazane su u nelineariziranom stvarnom području te iznose.

$$S = 0,102588 \text{ Hz/g}$$

Vanjski uvjeti mogu utjecati na rad ovog uređaja, jer teoretski, svojstva materijala žice se mogu promijeniti, a time i konstanta  $Z$ . To daje naglasiti da ukoliko se toliko promijeni temperatura da utječe na promjenu svojstva materijala žice, doći će do pogreške. Pogreške takvog tipa, ali i proračun, odnosno mjerenje pri takvoj promjeni temperature nije rađeno, te je temperatura prilikom umjeravanja ostala ista, 28 °C, što je značilo konstantu  $Z$  istu za sva mjerenja.

Značajke poput pouzdanosti, obnovljivosti te životnog vijeka zahtijevale bi dulji period mjerenja i umjeravanja, tako to pitanje ostaje otvoreno za daljnja istraživanja.

Provjera valjanosti konstruiranog uređaja napravljena je tako da su izvagane dvije mase nepoznate vrijednosti kako bi preko lineariziranog odnosa dobili rezultat. Točna masa utega je određena vaganjem na preciznoj laboratorijskoj vagi. Izračunati rezultati prikazani su u tablici 3.:

Tablica 3. Rezultati mjerenja nepoznate mase utega

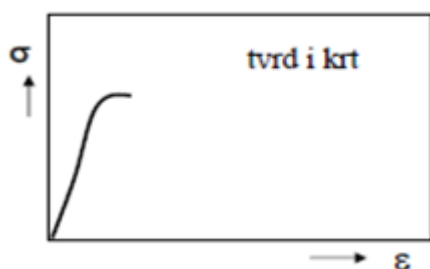
Frekvencija izmjerena/Hz	teoretska masa/g	eksperimentalna masa/g
362,52	1700	1714,33
491,28	3200	3148,40

Prikazani rezultati mjerenja ukazuju na vrlo dobro slaganje teoretskih i eksperimentalno dobivenih vrijednosti.

#### 4.2.3. Mehanička svojstva žice

Već je spomenuta važnost svojstava materijala žice za ovakav mjerni uređaj. Ne samo da čini osnovu nego je od velike važnosti za definiranje mjernog područja. Zbog neispravnosti kicalice u trenutku izrade ovog rada, nisu određena mehanička svojstva žice (dijagram naprezanje-deformacija). Maksimalna napetost žice omogućila bi određivanje gornje vrijednosti mjernog područja, odnosno mogla bi se definirati najveća dopuštena masa. Treba spriječiti *plastične deformacije* materijala žice, a visok Youngov modul elastičnosti omogućuje male elastične deformacije pri naprezanju. Nakon granice proporcionalnosti i granice elastičnosti, dolazi granica razvlačenja, a ubrzo nakon toga pucanje materijala žice, jer želimo izbjeći razvlačenje kako se ne bi promijenila linijska gustoća mase žice. Potreban je, dakle, tvrd i krhak materijal.

Porast temperature utječe na povećanje duljine žice. Ako je temperatura za cijelo vrijeme mjerenje ista, teoretski neće utjecati na promjenu rezultata. No ako se ona mijenja tijekom mjerenja, a znatno utječe na svojstva materijala (primjerice Youngov modul), tada je to velik problem i mjerenje bi se moralo zaustaviti, ili prilagoditi uvjetima.



Slika 4-12. Ovisnost naprezanja  $\sigma$ , o deformaciji  $\epsilon$  tvrdog i krhkog materijala [11]

#### 4.2.4. Općenito o frekvencijskoj vagi

Frekvencijska vaga ovakve izrade ima svojih prednosti, ali i niz nedostataka. Prednost je ta što ne ovisi o volumenu nepoznatog tijela kojeg treba izvagati, niti joj je potrebna ravna mjerna površina. Dobra je strana ovakve izvedbe, što se vidi sklad teorije i eksperimentalne vrijednosti, a da je izrada bila tomu bolja, to bi i rezultati bili točniji.

Vanjski uvjeti ne utječu previše na rad ovakve vage u prethodno zadanom mjernom području, odnosno dimenzijama aparature, ako je materijal žice imun na temperaturnu promjenu odnosno sa malim koeficijentom temperaturnog izduženja.

Zanimljiv je pristup mjerenju mase (sile) na ovakav način ako su tijekom mjerenja konstantna duljina i svojstva materijala žice, jer se prema teoretski postavljenom odnosu frekvencije i mase (str. 16) može, s jednom poznatom masom, primjerice najvećom dopuštenom (uz konstantne uvjete okoliša) dobiti teoretska statička karakteristika prema toj referentnoj masi. U ovom radu to nije iskazano niti jednom, jer je fokus bio na dokazivanju teoretskih značajki više nego usavršavanju aparature.

Nedostataka je bilo prilikom izrade aparature i umjeravanja, iako nedovoljno da bi bacilo sumnju na ovakav princip mjerenja. Kod izrade pomičnog čvrstog kraja žice korišten je pluteni čep. Trenje između žice i plutenog čepa tijekom mjerenja unosi određenu pogrešku u napetosti žice. U daljnjem radu potrebno je usavršiti ovaj detalj aparature.

Uređaj je umjeravan samo jednom kako da bi se pokazalo slaganje s teoretskim načelima. Daljnjim umjeravanjem mogu se odrediti neke bitne značajke mjernog pretvornika, poput primjerice, ponovljivosti. Na kraju ipak valjalo bi naglasiti da je moguća primjena ovakvog uređaja, te da su temeljni principi i teorija dokazani.

## 5. ZAKLJUČAK

Razvijena je aparatura za mjerenje mase tijela obješenog na žicu na temelju izmjerene osnovne frekvencije titranja napete žice. Eksperimentalni podaci mjerenja (u obzir su uzete pogreške prilikom konstrukcije i mjerenja) u dobrom su slaganju sa teorijskom osnovom. To govori da je metoda vrlo prilagodljiva, a da bi se dalje koristila u zahtjevnim primjenama (u praksi) potrebno je još dodatnih ispitivanja. Izrađen je mjerni pretvornik te umjeren mjerenjem frekvencije titranja napete žice opterećene poznatom masom. Izvedene su karakteristike mjernog pretvornika (poglavlje Rezultati) te su rezultati ohrabrujući za daljnja istraživanja. Frekvencijska vaga mogla bi naći primjenu u industriji gdje materijal pri doziranju pada na vagu, te se javljaju visoke i/ili promjenjive temperature, vlažnost okoline, prašina, otapala i ulja za podmazivanje, velike elektromagnetske interferencije, varijacije napona itd. ne ovisi temperaturnim uvjetima i volumenu vaganog tijela, ukoliko je dimenzionirana za tu primjenu. Upravo zbog tih razloga, u svom mjernom području u prednosti je nad vagama koje koriste druga mjerna načela. Također, dok je nekim vagama potrebno obratiti posebnu pozornost na mjernu površinu na koju dolazi uzorak (čistoća, smične sile, vodoravan položaj), ovdje to nije potrebno. Međutim, iako je opravdan način rada, uvelike ovisi o financijskim uvjetima. Za potrebe ovakve vage, pogotovo dimenzionira li se za uvjete industrije, materijal žice vrlo je bitan. Potrebni materijali vrlo su skupi u svojoj izradi, a trebalo bi utrošiti i određeno vrijeme za dimenzioniranje, što ovakvu vagu čini neefikasnom. Razvoj novih materijala dobrih svojstava donio bi uštede.

Trebalo bi, na kraju naglasiti edukativan pristup ovog rada. Primjer frekvencijske vage zbog jednostavnosti izrade, te jednostavnosti teorije može poslužiti kao eksperimentalna metoda dokazivanja vezanih fizikalnih načela ili jednostavna studentska vježba.

Ovaj rad se može uzeti kao osnova za detaljnija ispitivanja u ovom području, s naglaskom na dimenzioniranje uređaja.

## POPIS SIMBOLA

$F$  – sila, N

$\varepsilon_T$  – ukupa pogreška mjernog pretvornika

$\sigma$  – naprezanje, N/m<sup>2</sup>

$G$  – Sila teže, N

$m$  – masa, g

$g$  – ubrzanje sile teže,  $\approx 9.81$  m/s<sup>2</sup>

$T$  – sila napetosti žice, N

$\lambda$  – valna duljina, m

$l$  – duljina žice, m

$\nu$  – frekvencija, Hz

$\rho_l$  – duljinska gustoća, kg/m

$v$  – brzina, m/s

$Z$  – konstanta ovisnosti frekvencije o masi,  $s^{-1}g^{-0.5}$

$MO$  – mjerni opseg

$\varepsilon$  – deformacija

## LITERATURA

- [1] Božićević J., Temelji mehanike 2, 5. izdanje, Školska knjiga, Zagreb, 1987.
- [2] Bolf. N., Procesna mjerenja – mjerni pretvornici, interna skripta, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu, ZMAVP, Zagreb, 2016.
- [3] Sirohi R. S., Radha Krishna H. C, Mechanical measurments, third edition, John Wiley & sons, New York , 1991.
- [4] Figliola R. S., Beasley D. E., Theory and design for mechanical measurements, John Wiley & sons, New York, 1991.
- [5] Filipan V., Mehanika deformabilnih tijela 1, interna skripta, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu, 2015.
- [6] Westphal W., Fizika, Naučna knjiga, Beograd, 1949
- [7] Šepić R.J., Valovi, Fizika 2, Pomorski fakultet Sveučilišta u Rijeci 2012.
- [8] Crawford Jr. F. S., Waves, Berkeleyphysics course – volume 3, University of California, Berkeley, 1968.
- [9] Towne D. H., Wave phenomena, Dover Publications Inc., New York, 1967.
- [10] [http://www.tme.eu/en/details/ktir0421ds/pcb-optical-sensors/kingbright-electronic/?utm\\_source=findchips.com&utm\\_medium=cpc&utm\\_campaign=compare-2016-07&utm\\_source=supplyFrame&utm\\_medium=buyNow](http://www.tme.eu/en/details/ktir0421ds/pcb-optical-sensors/kingbright-electronic/?utm_source=findchips.com&utm_medium=cpc&utm_campaign=compare-2016-07&utm_source=supplyFrame&utm_medium=buyNow) (pristup 1.7.2016.)
- [11] Bratanović I., Završni rad, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu, 2015.

## ŽIVOTOPIS

Rođen sam 28. studenog 1991. godine u Zagrebu. Školovanje sam započeo u Zagrebu 1998. godine u Osnovnoj školi Gračani. Po završetku osnovne škole, upisao sam V. Gimnaziju u Zagrebu, informatičko-matematički smjer. Nakon završetka srednje škole upisao sam preddiplomski studij Kemijsko inženjerstvo na Fakultetu kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu. Za vrijeme studija sudjelovao sam u raznim izvannastavnim aktivnostima i sportskim natjecanjima te sam aktivan član Sportske udruge FKIT-Tigrovi, gdje sam posljednje dvije godine obnašao dužnost potpredsjednika. Aktivan sam član Studentskog zbora od početka studija, gdje sam prijašnjih godina obnašao dužnost potpredsjednika, te od ove akademske godine predsjednika Studentskog zbora Fakulteta kemijskog inženjerstva i tehnologije.